

重大工程装备

# 考虑残余应力焊接接头疲劳损伤演化研究

刘正阳<sup>1</sup>, 宋双印<sup>2</sup>, 谢蓉<sup>2</sup>, 于海洋<sup>2\*</sup>

(1.91007 部队, 福建 宁德 355011; 2.上海凌耀船舶工程有限公司, 上海 201108)

**摘要:** **目的** 更全面地掌握残余应力对焊接接头疲劳性能的具体影响。**方法** 采用先进的连续损伤力学方法, 深入研究对接焊接接头在循环载荷作用下的疲劳损伤演化过程。通过热-力耦合分析, 以评估焊接工艺引起的残余应力, 从而建立焊接接头在疲劳分析中使用的初始状态。同时, 将耦合损伤循环塑性本构方程编写为 ABAQUS 用户材料子程序 UMAT, 建立循环载荷下的有限元模型。**结果** 在前 10 个循环载荷作用下, 焊接接头出现了明显的应力松弛现象, 且疲劳损伤先缓慢增加, 然后快速增加。在前几个循环内, 疲劳损伤与循环次数呈现出线性关系, 即随着循环次数的增加, 疲劳损伤也逐渐累积。然而, 当疲劳损伤达到 0.25 左右时, 其增长速度显著加快, 材料开始出现明显的性能下降, 最终导致失效。**结论** 这一研究成果能够更准确地预测焊接接头在循环载荷作用下的疲劳寿命, 从而为工程实践提供有力的理论指导。

**关键词:** 残余应力; 焊接接头; 疲劳损伤; 损伤演化; 本构方程; UMAT

中图分类号: TG580

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)10-0137-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.10.017

## Fatigue Damage Evolution of Welded Joints Considering Residual Stress

LIU Zhengyang<sup>1</sup>, SONG Shuangyin<sup>2</sup>, XIE Rong<sup>2</sup>, YU Haiyang<sup>2\*</sup>

(1. Unit 91007, Fujian Ningde 355011, China; 2. Shanghai Lingyao Marine Engineering Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

**ABSTRACT:** The work aims to acquire a comprehensive understanding of the specific effect of residual stress on the fatigue behavior of welded joints. The advanced continuous damage mechanics method was adopted to study the fatigue damage evolution process in butt-welded joints under cyclic loading conditions. Thermal-mechanical coupling analysis was employed to assess the residual stresses introduced by the welding processes, thus establishing the initial state of the welded joints for fatigue analysis. Furthermore, a coupled damage cyclic plastic constitutive equation was implemented as a user-defined material subroutine (UMAT) in ABAQUS to develop a finite element model for simulating cyclic loading conditions. During the initial 10 loading cycles, the welded joint exhibited significant stress relaxation, and fatigue damage progressed initially at a slow rate, followed by a rapid acceleration. In the initial loading cycles, a linear relationship was observed between the fatigue damage and the number of cycles, indicating a gradual accumulation of fatigue damage with increasing cycle count. However, once the fatigue damage reached approximately 0.25, its growth rate underwent an obvious acceleration, signaling a significant degradation in material performance, ultimately leading to failure. The findings of this research provide an enhanced capability to predict the fatigue life of welded joints under cyclic loading conditions, offering valuable theoretical guidance for engineering applications.

**KEY WORDS:** residual stress; welded joints; fatigue damage; damage evolution; constitutive equations; UMAT

收稿日期: 2024-02-06; 修订日期: 2024-05-05

Received: 2024-02-06; Revised: 2024-05-05

引文格式: 刘正阳, 宋双印, 谢蓉, 等. 考虑残余应力焊接接头疲劳损伤演化研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(10): 137-142.

LIU Zhengyang, SONG Shuangyin, XIE Rong, et al. Fatigue Damage Evolution of Welded Joints Considering Residual Stress[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(10): 137-142.

\*通信作者 (Corresponding author)

疲劳是循环载荷下焊接接头的主要失效模式<sup>[1]</sup>。在过去的几十年里,人们对焊接接头的疲劳性能进行了大量的试验研究。疲劳强度不仅受材料疲劳性能和循环载荷条件的影响,而且还受焊接工艺引起的接头变化(如残余应力和焊接缺陷)的影响<sup>[2]</sup>。由于加热和随后冷却的强烈集中,在熔合区和热影响区不可避免地形成残余应力,这些残余应力叠加在循环载荷上,导致最大应力和平均应力水平显著增加,从而降低疲劳寿命<sup>[3]</sup>。

基于应力的方法和断裂力学方法是用于评估焊接接头疲劳寿命的2种主要方法<sup>[4]</sup>。一种方法是基于S-N曲线,该曲线将导致失效的循环次数N与所施加的循环应力范围S相关联。应力范围可以用名义应力、热点应力或局部缺口应力来表示。S-N曲线来自于许多具有特定焊缝细节的疲劳实验,其中包括残余应力的影响。另一种是断裂力学方法,它侧重于材料制造或焊接过程中产生的裂纹的扩展行为,或在使用载荷下的裂纹萌生。使用无损检测的方法检测到的焊接缺陷被归类为椭圆形初始裂纹。然而,它忽略了裂纹萌生期,导致严重低估的疲劳寿命,特别是在高周疲劳状态。虽然它们被广泛用于评估疲劳寿命,但这2种方法都不能考虑疲劳损伤的演变及其对材料性能的影响<sup>[5-6]</sup>。

为此,本文将连续损伤力学方法引入焊接接头在循环载荷作用下的疲劳损伤分析,定义为测量材料中的微裂纹和微空隙的损伤变量被纳入疲劳损伤模型。它涉及宏观尺度下劣化材料的力学行为,并根据热力学<sup>[7]</sup>得出的演化规律评估渐进损伤。蒋伟等<sup>[8]</sup>为了深入探究焊接残余应力如何影响焊接件的疲劳寿命,特地构建了一个循环黏塑性本构模型。该模型旨在预测残余应力的动态变化及其对疲劳寿命的具体作用,并随后通过一系列实验进行验证。经过细致的分析和对比,结果显示,该本构模型在估算残余应力演化方面表现相对精准。残余应力对疲劳寿命的影响主要体现在平均应力的提升上。然而,这一模型在循环过程中并未充分考量疲劳损伤的影响,因此其对疲劳寿命的预测结果稍高于实际水平。沈飞等<sup>[9-10]</sup>深入探讨了外部参数对微动疲劳裂纹起裂过程的影响,并构建了一个弹塑性疲劳损伤模型,该模型充分考虑了孔隙诱导应力集中的因素。其研究结果显示,在预测微动疲劳寿命时,无论是疲劳损伤还是磨损,都是不容忽视的关键因素。材料在接触面处的磨损实际上减轻了滑移区的载荷。通过对比有磨损和无磨损2种情况下局部CDM法得出的预测结果,他们发现,考虑磨损时,预测的疲劳裂纹起裂寿命要高于不考虑磨损时的预测值。此外,研究还发现,在考虑磨损因素的情况下,非局部疲劳模型在提高微动疲劳寿命方面的效果,相较于不考虑磨损时要小一些。然而,该研究也存在一定的局限性,即缺乏精确匹配的实验磨损系数数据,

因此在实际应用中,他们不得不采用估计值,这无疑是在研究中的一个不足之处。

本文研究了焊接接头在存在残余应力的情况下的疲劳损伤演化规律。通过热-力耦合分析,得到了接头残余应力的分布规律。建立了疲劳损伤模型,以得到的残余应力为初始状态下的疲劳损伤演化规律。考虑残余应力的焊接接头疲劳损伤演化研究对于工程实践、学术发展和技术进步都具有重要意义。通过这一研究,可以更好地理解焊接结构的疲劳性能,为提高结构的可靠性和安全性提供有力支持。

## 1 本构方程

本文在连续损伤力学的框架下引入损伤变量,假设各向同性损伤,损伤变量为标量D,同时本文满足损伤耗散势的等效假设<sup>[11]</sup>与基于应变等效的假设<sup>[12]</sup>。本文在Chaboche塑性模型中使用有效应力代替柯西应力,并将损伤变量纳入Chaboche塑性模型中<sup>[13]</sup>。本文中的本构方程涉及损伤演化、屈服准则、塑性流动准则和硬化模型(如图1所示),详细如下所述。

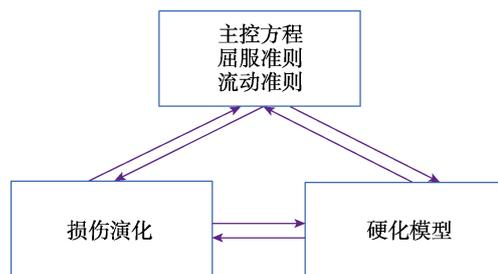


图1 循环塑性本构方程  
Fig.1 Cyclic plastic constitutive equation

1) 损伤演化模型。在疲劳过程中,材料的疲劳损伤会随着循环次数的增加而累积,这是一个不可逆且逐渐退化的过程。在高周疲劳状态下,损伤演化规律可由式(1)~(3)表示<sup>[14]</sup>:

$$\frac{dD}{dN} = a \left[ \frac{A_{II}}{M_0(1-3b\sigma_{H,\text{mean}})(1-D)} \right]^\beta \quad (1)$$

$$A_{II} = \frac{1}{2} \left[ \frac{3}{2} (S_{ij,\text{max}} - S_{ij,\text{min}}) (S_{ij,\text{max}} - S_{ij,\text{min}}) \right]^{0.5} \quad (2)$$

$$\sigma_{H,\text{mean}} = \frac{1}{6} (\sigma_{kk,\text{max}} + \sigma_{kk,\text{min}}) \quad (3)$$

式中:  $N$  为循环次数;  $a$ 、 $M_0$ 、 $b$ 、 $\beta$  为材料参数,  $\sigma_{H,\text{mean}}$  为一次循环中静水压力的平均值;  $S_{ij,\text{max}}$  和  $S_{ij,\text{min}}$  分别为循环中静水压力的最大值与最小值。需当为单轴加载时,式(1)和(2)分别表示为应力幅值和平均应力。

2) 主控方程。考虑到疲劳损伤的影响,基于应变等效假设,使用等效力代替弹性定律和 von Mises 屈服准则中使用的应力,并将损伤变量耦合到

Chaboche 塑性模型<sup>[15]</sup>。小应变假设下的总应变分解表示为:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^p \quad (4)$$

式中:  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为应变张量;  $\boldsymbol{\varepsilon}^e$  和  $\boldsymbol{\varepsilon}^p$  分别为弹性应变张量和塑性应变张量。

$$\boldsymbol{\sigma} = (1-D)\mathbf{C}^e : \boldsymbol{\varepsilon}^e \quad (5)$$

式中:  $\boldsymbol{\sigma}$  为应力张量;  $\mathbf{C}$  为弹性张量;  $D$  为各向同性损伤变量。von Mises 屈服条件可由式 (6) 表示:

$$f = \sqrt{\frac{3}{2} \left( \frac{\mathbf{S}}{1-D} - \boldsymbol{\alpha} \right) : \left( \frac{\mathbf{S}}{1-D} - \boldsymbol{\alpha} \right)} - \sigma_l \quad (6)$$

式中:  $\sigma_l$  为屈服面半径;  $\mathbf{S}$  为偏应力张量;  $\boldsymbol{\alpha}$  为背应力张量。采用正交塑性流动准则, 如式 (7) 所示:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\lambda}}{1-D} \frac{\mathbf{S} / (1-D) - \boldsymbol{\alpha}}{\mathbf{S} / (1-D) - \boldsymbol{\alpha}} \quad (7)$$

$$\dot{P} = \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p} = \frac{\dot{\lambda}}{1-D} \quad (8)$$

式中:  $\dot{P}$  为等效塑性应变率。

3) 随动硬化率。为了研究循环载荷下塑性行为对残余应力的影响, 费申等<sup>[9-10]</sup>认为可以忽略各向同性硬化规律, 并提出了循环载荷下循环塑性硬化后的耦合损伤模型。

$$\boldsymbol{\alpha} = \sum_{i=1}^m \boldsymbol{\alpha}^{(i)} \quad (9)$$

$$\dot{\boldsymbol{\alpha}}^{(i)} = (1-D) \left[ \frac{2}{3} C^{(i)} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \mu \gamma^{(i)} \boldsymbol{\alpha}^{(i)} \dot{P} \right] - \frac{\boldsymbol{\alpha}^{(i)}}{1-D} \dot{D} \quad (10)$$

式中:  $C^{(i)}$  和  $\gamma^{(i)}$  为材料常数;  $\mu$  为棘轮控制参数<sup>[16-17]</sup>。

采用 FORTRAN 语言, 将上述公式编写为 ABAQUS 用户自定义材料子程序 UMAT( 流程如图 2 所示)。在编写的 UMAT 子程序中, 状态变量输出需要在 Step 中选取 SDV 输出。在该子程序中, 在单元的每个积分点的每个增量步结束时, 使用编写的 UMAT 子程序提供一个新的雅可比矩阵, 以更新应力和解相关的状态变量 (SDV)。由于模拟每一个循环加载的计算成本较高且耗时, 因此在数值实现中采用跳跃程序, 在该程序中假设应力、累积塑性应变和损伤变量在  $\Delta N$  循环的有限周期内保持不变, 如式 (11) 所示<sup>[18]</sup>。

$$D_{N+1} = D_N + 0.01 \left( \frac{dD}{dN} \right)_N N \quad (11)$$

式中:  $N$  为循环次数。

对于材料损伤判据, 从费申等<sup>[9-10]</sup>的试验数据中可以看到, 在循环初期, 损伤变量  $D$  因材料的循环软化而有较高的增量率。而随着循环次数的增加, 损伤增长率逐渐降低, 并趋于稳定增加。在达到一定的循环次数后, 损伤增长率持续, 直到材料由于宏观裂纹的形成而失效。因此, 本文选择  $D_c=0.3$ 。

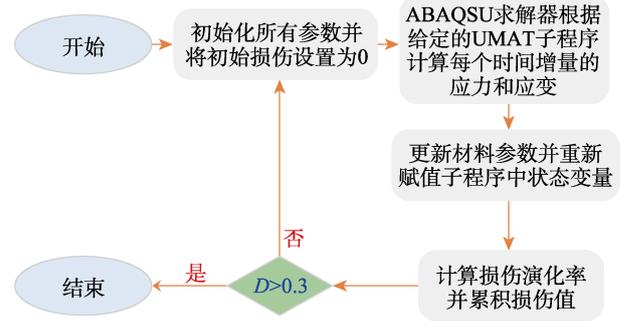


图 2 本构方程实现形式流程  
Fig.2 Flow chart of constitutive equation realization form

## 2 有限元建模

### 2.1 模型的建立与网格划分

建立如图 3 所示的有限元模型, 模型中间区域为焊接区域。为了确保计算结果不受网格单元数量的影响, 模拟了不同数量的网格。结果表明, 当网格数量超过 11.2 万个时, 计算结果没有进一步变化。因此, 为了在合理的运行时间内获得足够的模拟精度, 采用了以下网格划分方法: 将焊接残余应力区划分较为细密的网格, 远离焊接区划分粗大一点的网格, 共划分 112800 个网格, 网格单元类型为 CSD8R。

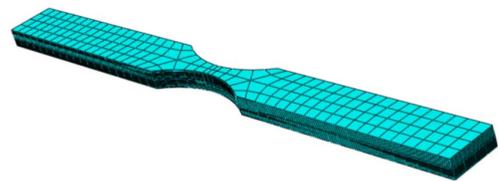


图 3 划分网格后有限元模型  
Fig.3 Finite element model after grid division

### 2.2 材料参数

为了使有限元仿真模拟结果更贴近实际工况, 选择与实际中相同材料 40Cr, 其力学性能参数如表 1 所示。为了获得更真实有效的有限元模拟结果, 在耦合损伤循环塑性本构方程中, 应考虑 40Cr 疲劳试验作为本构方程参数的输入。本文通过对 40Cr 材料进行单轴拉伸试验和循环变形试验, 由试错法不断调整得到的本构方程参数和损伤参数如表 2、表 3 所示。

表 1 40Cr 的力学性能参数  
Tab.1 Mechanical property parameters of 40Cr

温度/°C	杨氏模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa
20	208.9	0.27	421	807
150	205.5	0.28	365	740
300	188.8	0.29	315	680
450	131.2	0.30	215	653
600	111.1	0.31	201	472
750	85.0	0.32	183	290

表 2 40Cr 钢的本构方程参数  $C^{(i)}$  和  $\gamma^{(i)}$   
Tab.2 constitutive equation parameters of 40Cr steel

$i$	循环硬化参数		棘轮参数
	$\gamma^{(i)}$	$C^{(i)}/\text{MPa}$	
1	10 000	130 5000	$u_{\text{sat}}=0.05$
2	130	18 525	$k=10$
3	15.5	9 377.5	无

表 3 40Cr 钢的损伤参数  
Tab.3 Damage parameters of 40Cr steel

$a$	$b/\text{MPa}^{-1}$	$c$	$M_0/\text{MPa}$
$3.4 \times 10^{-29}$	$5.0 \times 10^{-4}$	8.796	1

### 2.3 焊接残余应力

焊接过程涉及由热传递、冶金转变和机械行为之间的相互作用引起的复杂现象。焊接接头在加热和冷却过程中会产生残余应力，这对焊接接头的疲劳评估至关重要。本文采用热-力顺序耦合的方法评估焊接接头的残余应力。其中，热源可由 GOLDAK 模型中的两个椭球分布进行描述，如式(12)、(13)所示<sup>[19-20]</sup>。

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f\delta Q}{lm_f n\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{l^2} - \frac{3(y-vt)^2}{m_f^2} - \frac{3z^2}{n^2}\right) \quad (12)$$

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r\delta Q}{lm_r n\pi\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{3x^2}{l^2} - \frac{3(y-vt)^2}{m_r^2} - \frac{3z^2}{n^2}\right) \quad (13)$$

式中： $Q$  为热功率； $\delta$  为热效率； $f_f$  和  $f_r$  分别为前区和后区的热输入比例；参数  $l$ 、 $m_f$ 、 $m_r$ 、 $n$  分别设为 6.0、7.0、9.0、4.5 mm。假设  $\delta$ 、 $f_f$ 、 $f_r$  分别为 0.5、1.4、0.6。

采用元素杀死和再生方法对 3 个过程中填充材料的添加进行建模<sup>[21]</sup>。在焊接过程中，焊接区中的所有元素最初都是不活动的。对于每一个焊道，首先激活焊道中的单元，通过移动热源到这些单元上来模拟焊接过程。在模拟中应用这些道次之间的短冷却时间。第 3 道焊接后，模型逐渐冷却至室温。由于模型的变化，热辐射和对流边界被设置为对应于每个通道。填充材料 ER 5356 与基础材料不同，如果在残余应力的模拟中考虑 2 种材料热性能和力学性能的差异，将更加合理。然而，材料 ER 5356 的温度依赖性在文献中不可用。因此，本研究未考虑基材和填料的材料特性之间的差异，相变也没有考虑在内。焊接方向为沿着  $y$  方向，通过约束两侧面的位移，固定底面沿  $z$  方向的沿着位移，消除了焊接过程引起的变形。焊接完成后，测得  $x$  方向上残余应力为 200 MPa， $y$  方向上残余应力为 261 MPa。由于循环载荷是沿  $x$  方向施加的，因此沿该方向的残余应力对于疲劳损伤和寿命的预测至关重要。分析得到的多轴残余应力场将

被导入到后续的疲劳损伤分析中<sup>[22]</sup>。

## 3 结果与讨论

### 3.1 残余应力松弛

通过在条件  $\sigma_a=100$  MPa 下的预测研究了残余应力松弛过程。循环 10 000 次下的应力云图如图 4 所示，最大损伤点处残余应力  $x$  方向与  $y$  方向上的松弛曲线如图 5 所示。可以发现，在前 10 个循环中，出现了明显应力松弛现象， $x$  方向上由初始的 200 MPa 松弛到了 180 MPa， $y$  方向上由初始的 261 MPa 松弛到了 243 MPa。这是由于外部循环应力施加在  $x$  方向上，因此该方向上的塑性应变远大于  $y$  方向上的塑性应变。在第 1 个循环的加载期间，由于明显的塑性应变，显著的塑性应变导致残余应力的重新分布。在此之后，由于应力比为 0，有一个弹性卸载阶段，直到外部循环载荷完全消失。在随后的循环中，由疲劳损伤引起的塑性变形仍然存在（如图 5 所示），因此残余应力逐渐减小。残余应力松弛速率随疲劳损伤的增加而增加，尤其是应力松弛速率。如果本构模型中没有考虑疲劳损伤，则在第 1 次循环后将观察到弹性安定，残余应力将保持稳定状态。结果表明，残余应力的松弛是塑性变形和疲劳损伤共同作用的结果<sup>[22-23]</sup>。

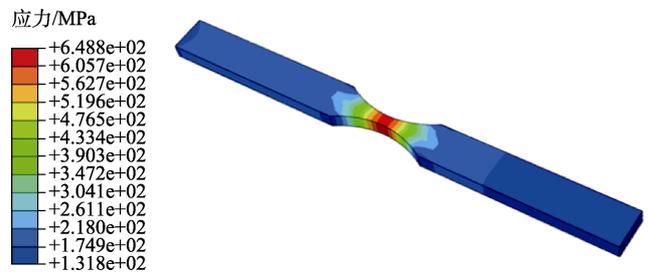


图 4 循环 10000 次下的应力云图  
Fig.4 Stress cloud map after 10000 cycles

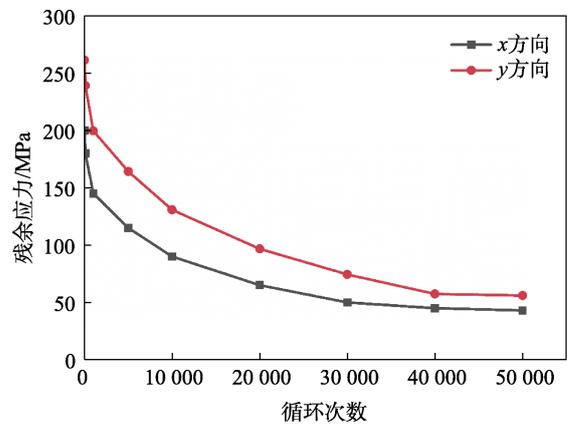


图 5 最大损伤点处残余应力的松弛曲线  
Fig.5 Residual stress relaxation curve at the maximum damage point

### 3.2 疲劳损伤演化

在循环载荷  $\sigma_a=100$  MPa 作用下模拟试样疲劳损伤演化, 循环 10 000 次下的损伤云图 (疲劳损伤由代码中 SDV38 输出) 如图 6 所示。由图 7 可知, 疲劳损伤主要集中在残余拉应力区。最大损伤发生在最大残余应力位置, 接近临界值 1.0, 这是由于其与所施加的循环载荷的方向相同。此时疲劳损伤的演变如图 2 所示。在整个寿命的前半期, 疲劳损伤随循环次数的增加而缓慢增加, 疲劳损伤与循环次数呈线性关系。当疲劳损伤达到 0.25 左右时, 其增长显著增加, 导致试样失效。这是由于焊接区的总应力是残余应力和外循环载荷的叠加, 在第 1 个循环中, 计算的最大 Mises 应力已经超过屈服应力, 塑性区中的材料在第 1 个循环之后硬化。由于零应力比不存在压缩塑性变形, 如果本构模型中不考虑疲劳损伤, 则在第一次加载循环后将不再出现塑性应变。在本研究中, 材料性能随着疲劳损伤的累积而退化, 因此屈服函数将在随后的疲劳加载循环中得到满足<sup>[24-25]</sup>。

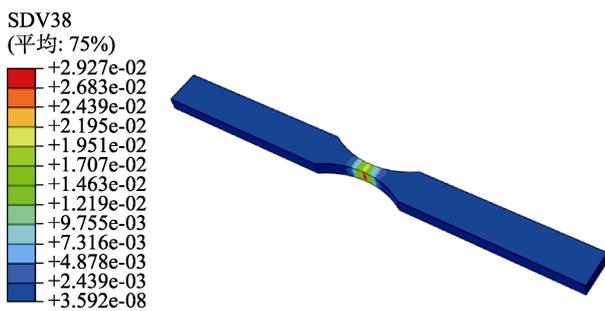


图 6 循环 10 000 次下损伤云图  
Fig.6 Damage cloud map after 10 000 cycles

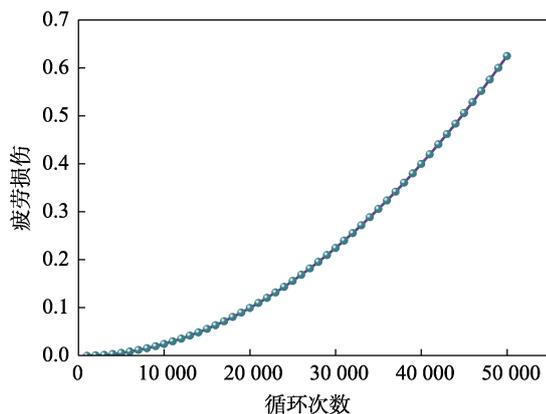


图 7 最大损伤点的疲劳损伤演化  
Fig.7 Evolution of fatigue damage at the maximum damage point

## 4 结论

为了更好地了解残余应力对焊接接头疲劳性能的影响, 采用连续损伤力学方法对接焊接接头在循环载荷作用下的疲劳损伤演化进行了研究。通过热-力

耦合分析评估焊接过程中产生的残余应力, 从而建立焊接接头的初始状态, 用于疲劳分析。本文得到的结论如下:

1) 在前 10 个循环中出现了明显应力松弛现象,  $x$  方向上由初始的 200 MPa 松弛到了 180 MPa,  $y$  方向上由初始的 261 MPa 松弛到了 243 MPa。这是由于外部循环应力施加在  $x$  方向上, 因此该方向上的塑性应变远大于  $y$  方向上的塑性应变。

2) 在整个寿命的前半期, 疲劳损伤与循环次数呈线性关系。当疲劳损伤达到 0.25 左右时, 其增长显著增加, 从而导致试样失效。

### 参考文献:

- [1] 马清波, 黄显峰, 黄君辉, 等. 角焊缝不同焊接形式对焊接接头疲劳性能的影响[J]. 焊接技术, 2023, 52(12): 46-49.  
MA Q B, HUANG X F, HUANG J H, et al. Influence of Different Welding Forms of Fillet Weld on Fatigue Performance of Welded Joint[J]. Welding Technology, 2023, 52(12): 46-49.
- [2] 冯超, 赵雷, 徐连勇, 等. 基于集成数据驱动方法的焊接接头疲劳寿命预测模型[J]. 焊接学报, 2023, 44(11): 8-13.  
FENG C, ZHAO L, XU L Y, et al. Investigation on Fatigue Life Prediction Approach of Welded Joints via Integrated Data-Driven Method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(11): 8-13.
- [3] 焦广臣, 占勇, 温建锋. 考虑焊缝和母材不同材料特性的焊接平板疲劳裂纹扩展行为模拟[J]. 焊接学报, 2023, 44(11): 52-58.  
JIAO G C, ZHAN Y, WEN J F. Simulation of Fatigue Crack Growth Behavior in Welded Plates Considering Different Material Properties of Weld and Base Metals[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2023, 44(11): 52-58.
- [4] 李乾坤, 李学旺, 赵春雨, 等. 机械密封中  $\Omega$  形和 U 形波纹管的疲劳寿命分析[J]. 机电工程技术, 2023, 52(12): 163-166.  
LI Q K, LI X W, ZHAO C Y, et al. Fatigue Life Analysis of  $\Omega$  Shape and U Shape Bellows in Mechanical Seal[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(12): 163-166.
- [5] 梁刚, 杨佳男, 李淑敏, 等. Q460 高强度交错孔板疲劳损伤后力学性能研究[J]. 振动与冲击, 2023, 42(23): 307-315.  
LIANG G, YANG J N, LI S M, et al. Mechanical Properties of Q460 HSS Multi-Staggered-Hole Plate after Fatigue Damage[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(23): 307-315.
- [6] 宋建, 阎琨. 基于 Chaboche 模型的 3D 打印 GH3536 材料本构参数拟合研究[J]. 塑性工程学报, 2023, 30(10): 167-173.

- SONG J, YAN K. Study on Constitutive Parameter Fitting of 3D Printed GH3536 Material Based on ChabocheModel[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30(10): 167-173.
- [7] 韩飞, 穆思超, 李姝. QP980 高强度钢在辊弯成形中的循环塑性行为和回弹预测[J/OL]. *材料工程*, 2023: 1-9. [2023-04-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1800.TB.20230427.0932.002.html>.
- HAN F, MU S C, LI S. Cyclic Plastic Behavior and SpringBack Prediction of QP980 High Strength Steel in Roll Bending[J/OL]. *Materials Engineering*, 2023: 1-9. [2023-04-27]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1800.TB.20230427.0932.002.html>.
- [8] JIANG W C, XIE X F, WANG T J, et al. Fatigue Life Prediction of 316L Stainless Steel Weld Joint Including the Role of Residual Stress and Its Evolution: Experimental and Modelling[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 143: 105997.
- [9] SHEN F, HU W P, MENG Q C. A Non-Local Approach Based on the Hypothesis of Damage Dissipation Potential Equivalence to the Effect of Stress Gradient in Fretting Fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2016, 90: 125-138.
- [10] SHEN F, ZHAO B, LI L, et al. Fatigue Damage Evolution and Lifetime Prediction of Welded Joints with the Consideration of Residual Stresses and Porosity[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 103: 272-279.
- [11] SANTUS C, ROMANELLI L, GROSSI T, et al. Elastic-Plastic Analysis of High Load Ratio Fatigue Tests on a Shot-Peened Quenched and Tempered Steel, Combining the Chaboche Model and the Theory of Critical Distances[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 174: 107713.
- [12] SPRINGER S, SEISENBACHER B, LEITNER M, et al. ChabocheViscoplastic Material Model for Process Simulation of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Parts[J]. *Welding in the World*, 2023, 67(4): 997-1007.
- [13] SANTUS C, ROMANELLI L, GROSSI T, et al. Investigation of Chaboche and Bouc-Wen Parameters of Quenched and Tempered Steel and Comparison of Model Predictive Capabilities[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(5): 2961.
- [14] DVORŠEK N, STOPEINIG I, KLANČNIK S. Optimization of Chaboche Material Parameters with a Genetic Algorithm[J]. *Materials*, 2023, 16(5): 1821.
- [15] DU R, ZHANG X D, WANG H M, et al. A Revised Chaboche Model from Multiscale Approach to Predict the Cyclic Behavior of Type 316 Stainless Steel at Room Temperature[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 167: 107303.
- [16] LETOUFA Y. Estimating the Stress and Fatigue Damage of a Thin Film with Non-Linear Viscoelastic Using Asymptotic Analysis[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2024, 442: 115717.
- [17] LEI Z B, LIU G, CONG Y, et al. Research on Fatigue Damage Mitigation of Offshore Wind Turbines by a Bi-Directional PSTMD under Stochastic Wind-Wave Actions[J]. *Engineering Structures*, 2024, 301: 117275.
- [18] LIANG Z H, RAMAKRISHNAN K R, NG C T, et al. Vibration-Based Prediction of Residual Fatigue Life for Composite Laminates through Frequency Measurements[J]. *Composite Structures*, 2024, 329: 117771.
- [19] DONG S, WEI J C, ZHAO N, et al. Characterization of Fatigue Damage Accumulation and Prediction of Modulus Deterioration for Cement Stabilized Base[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2023, 24(1): 136360.
- [20] SUN H S, SONG L, YU Z W. Assessing the Fatigue Damage of Concrete Structures Using Automatically Classified Crack Severity Level Information[J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 179: 108071.
- [21] 周浩, 刘飞龙, 李桐, 等. 基于改进 3 参数幂函数能量法的 GH4169 合金热机械疲劳寿命预测[J/OL]. *航空发动机*, 2024: 1-6. [2024-01-08]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1359.V.20240104.1634.012>.
- ZHOU H, LIU F L, LI T, et al. Thermo-Mechanical Fatigue Life Prediction of GH4169 Alloy Based on Improved 3-Parameter Power Function Energy Method [J/OL]. *Aeroengine*, 2024: 1-6. [2024-01-08]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1359.V.20240104.1634.012>.
- [22] 马雄, 李翠, 杨飘. 航空发动机涡轮叶片疲劳寿命预测和可靠性分析[J]. *科学技术创新*, 2024(2): 209-212.
- MA X, LI C, YANG P. Aero-Engine Turbine Blade Fatigue Life Prediction and Reliability Analysis[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2024(2): 209-212.
- [23] PARK G J, JANG D M, JANG J W, et al. Comparison of Thermal-Fatigue Lives of Conventional and Hybrid Solder Joints: Experiment and FE Analysis[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 157: 107907.
- [24] ZHANG Q L, HU L, GAO X F. Fatigue Life Prediction of Steel Spiral Cases in Pumped-Storage Power Plants: Factors to Be Considered[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 157: 107908.
- [25] YIN X, SHANG D G, ZUO L X, et al. Fatigue Life Prediction Considering Individual Modulus for Unidirectional Needled C/SiC Composites under Variable Amplitude Loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 295: 109816.